

УДК 681.3:002

## АНАЛИЗ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

И.Х. Хахо

Кабардино-Балкарский государственный университет, г. Нальчик  
Республиканский центр НИТ, г. Нальчик  
E-mail: k\_khakho@mail.ru

*Изучены динамические характеристики электрооборудования с учетом вероятностных свойств сейсмических сигналов и динамических характеристик промышленных объектов. Проведен анализ экспериментальных оценок вероятности распределения максимумов реакций натурных образцов электрооборудования и получены предварительные вероятностные оценки их сейсмостойкости.*

### Ключевые слова:

*Анализ, моделирование, алгоритм, информация, фаза, амплитуда, частота, вероятность, функция распределения, плотность распределения, сейсмостойкость, передаточная функция.*

### Введение

В основу оценки сейсмостойкости технических объектов положена их работоспособность при сейсмических воздействиях различной балльности. За критерий сейсмостойкости оборудования целесообразно принять предельно допустимые нагрузки от сейсмического воздействия. Традиционный подход [1–6] основан на использовании 5–6 трехкомпонентных акселерограмм землетрясений, которые рекомендуют сейсмологи для конкретных площадок. Однако для проведения комплексных расчетно-экспериментальных исследований необходим учет всех действующих факторов (разброс динамических характеристик, рабочее состояние изделий, определяемое условиями их изготовления, сборки и установки на штатных местах, сейсмические воздействия и др.). Достоверность оценок сейсмостойкости существенным образом зависит от правильности определения исходного состояния оборудования перед началом сейсмического воздействия. Способность электрооборудования сохранять работоспособность при сейсмических нагрузках связана также с реализацией возможностей несущих конструкций и дополнительных мероприятий, которые не используются в нормальных условиях эксплуатации.

Оценка сейсмостойкости производится нами [7, 8] с учетом наблюдаемого в реальных условиях разброса динамических характеристик исследуемого электрооборудования. Землетрясение рассматривается как случайный процесс [2], представляющий собой колебания земной поверхности в диапазоне частот от 1 до 30 Гц, продолжающийся от 0,1 до 0,6 г и выше при максимальном энергосодержании, обычно проявляющемся в первые 5...10 с. В работе используется принцип, в основе которого лежит положение о том, что вероятность возникновения максимальной амплитуды в формируемом испытательном сейсмическом сигнале ниже вероятности возникновения технологической аварии на техническом объекте. Этот принцип не противоречит положению о большей надежности электрооборудования при сейсмических нагрузках, приводящих к их отказам по общей причине, по сравнению с его надежностью при случайных отказах.

вания при сейсмических нагрузках, приводящих к их отказам по общей причине, по сравнению с его надежностью при случайных отказах.

### Формирование испытательного сейсмического сигнала

Известно [2], что землетрясению определенной балльности соответствует среднее значение максимальной амплитуды ускорения. Поэтому при расчетах и испытаниях на сейсмостойкость оборудования возникает задача формирования сейсмического сигнала  $X_c(t)$ , вероятность превышения максимальной амплитуды которого с учетом вероятности возникновения землетрясения равной  $10^{-4}$ , составляла бы  $10^{-3}$ . Иными словами, необходимо сформировать сейсмический сигнал с максимальной амплитудой, вероятность возникновения которого составляла бы  $10^{-7}$  для девятибалльного землетрясения по шкале MSK 64.

В общем случае вероятность отказа  $P(otk)$  оборудования при сейсмическом воздействии выглядит как:  $P(otk) = \sum P(i)P(otk/i)$ , где  $P(i)$  – вероятность возникновения землетрясения  $i$ -ой балльности в данном районе;  $P(otk/i)$  – вероятность отказа, при землетрясении  $i$ -ой балльности;  $n$  – максимальная балльность землетрясения, наблюдавшегося на данной площадке. Принято считать, что величинами  $P(otk/i)$  при  $i < n$  можно пренебречь, отсюда  $P(otk) = P(n)P(otk/n)$ .

Величина  $P(otk/n)$  определяется следующим образом:  $P(otk/n) = \int \omega(a/n) \rho(otk/a) da$ , где  $\omega(a/n)$  – плотность вероятности выброса в акселерограмме землетрясения  $n$ -ой балльности;  $\rho(otk/a)$  – плотность вероятности отказа прибора данной серии при действии на него случайного сигнала с максимальной амплитудой, превышающей  $a$ . Произведем оценку величины  $P(otk/n)$  следующим образом:

$$P(otk/n) = \int_0^{\infty} \omega(a/n) \rho(otk/a) da \leq \int_0^{\infty} \omega(a/n) \theta(a - a^*) da = \int_{a^*}^{\infty} \omega(a/n) da = P(a^*/n).$$

Здесь заменена реальная (неизвестная) плотность вероятности  $p(otk/a)$  на функцию Хевисайда: где  $a^*$  – это абсолютный минимум амплитудно-частотной границы работоспособности оборудования данной серии.

Таким образом, вероятность отказа оборудования при землетрясении  $n$ -ой балльности оценивается сверху вероятностью превышения уровня  $a^*$  максимальным значением случайного процесса:

$$P(otk/n) \leq P(a^*/n) \text{ или } P(otk) \leq P(n)P(a^*/n).$$

Поскольку  $P(otk)$  задается априори (по последним данным  $P(otk)=10^{-7}$ ), а  $P(n)$  можно оценить по карте сейсмического районирования РФ (при  $n=9$ ,  $P(n)=10^{-4}$ ), то при расчетах и испытаниях на сейсмостойкость оборудования энергетических объектов возникает задача формирования реализации случайного сейсмического сигнала  $X_c^p(t)$  – расчетный сейсмический сигнал с максимальной амплитудой  $a$  такой, чтобы:  $P(a/n)=P(otk)/P(n)$ .

Рассмотрим методику создания расчетного сейсмического сигнала  $X_c^p(t)$ . Для этого проведем процедуру стационаризации расчетных акселерограмм землетрясений, рекомендуемых сейсмологами для строительной площадки. На основании методики [4] из стационаризованных акселерограмм формируется синтезированный сейсмический сигнал  $X_c^p(t)$ . Предполагается [1], что амплитуды в полученном случайном стационарном процессе распределены по нормальному закону. По кривой вероятности максимальных выбросов для  $X_c^p(t)$  определяется  $a_{\max}$ , удовлетворяющая равенству:

$$P(a_{\max} / X_c^p(t)) = \frac{P(otk)}{P(n)}.$$

На основании данных частотного анализа синтезированного сигнала  $X_c^p(t)$ , путем вариации фазовых соотношений гармонических составляющих, строится расчетный сейсмический сигнал  $X_c^p(t)$ . Полученный таким образом сигнал имеет те же частотные характеристики, что и исходный  $X_c^p(t)$ , и максимальную амплитуду  $a_{\max}$ :

$$\max_{(t)} \{X_c^p(t)\} = a_{\max}.$$

Расчетные сейсмические сигналы используются для оценки максимальных ускорений на строительных конструкциях энергетических объектов, а также на технологическом и электротехническом оборудовании.

Кроме того, необходимо оценить и максимальные ускорения в местах установки приборов. Для этого следует выявить реакцию сложных механических систем на сейсмоздействие. Чтобы упростить задачу, разобьем сложную механическую систему на ряд последовательно соединенных звеньев, к которым относятся строительные конструкции, каркасы щитов и панелей, устанавливаемых на перекрытиях зданий, а также приборы, закрепленные на этих панелях. В ряде случаев изделия

одного типа (шкафы, щиты, панели) имеют значительный разброс динамических характеристик. Это значит, что испытания на сейсмостойкость одного конкретного изделия не позволяют однозначно судить о сейсмостойкости всей партии выпускаемых приборов.

Рассмотрим сложную механическую систему, состоящую из двух последовательно соединенных линейных подсистем, у которых наблюдается разброс динамических характеристик.

Предположим, что формы амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик подсистем не меняются, а только сдвигаются в определенном частотном диапазоне. Первое звено представлено набором амплитудно-частотных характеристик (АЧХ)  $A_k(\omega)$ , второе звено – набором амплитудно-частотных характеристик  $B_i(\omega)$  (рис. 1).

Для двух стационарных гауссовских случайных процессов продолжительностью  $T$  отдельно взятой реализации с заданными характеристиками  $S_1(\omega)$  и  $S_2(\omega)$ , а также  $P_1(a)$  и  $P_2(a)$ , где  $S(\omega)$  – спектральная плотность, а  $P(a)$  – вероятность выбросов амплитуды за границу  $a$ , справедливо следующее утверждение: если соблюдается неравенство:

$$\int_0^\infty S_1(\omega) d\omega > \int_0^\infty S_2(\omega) d\omega,$$

то  $a_1 > a_2$ , при  $P_1(a_1) = P_2(a_2)$ , где  $a_1$  и  $a_2$  – максимальные выбросы амплитуды рассматриваемых случайных процессов.

Таким образом, для определения максимального ускорения реакции первого звена, вероятность превышения которого задана, необходимо из набора амплитудно-частотных характеристик  $A_k(\omega)$  выбрать такую АЧХ  $A^*(\omega)$ , которая дает максимум величины  $H = \int_0^\infty S^*(\omega) d\omega$ .

Здесь  $S^*(\omega)$  – спектральная плотность случайного сигнала на выходе первого звена  $S^*(\omega) = A^2(\omega)S(\omega)$ , а  $S(\omega)$  – спектральная плотность сигнала на входе первого звена. АЧХ  $A^*(\omega)$ , в свою очередь, определяется из выражения

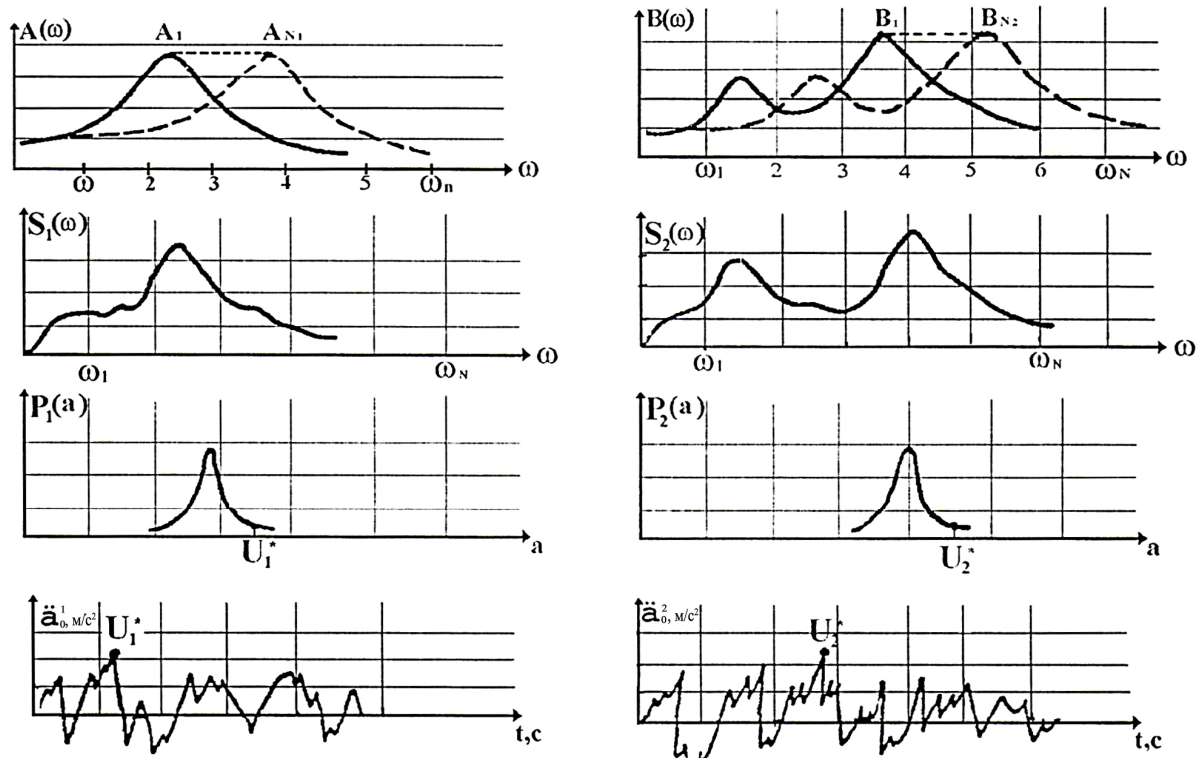
$$H^* \{A^*(\omega)\} = \max_{1 \leq k \leq N_1} \left\{ \int_0^\infty A_k^2(\omega) S(\omega) d\omega \right\}. \quad (1)$$

Имея  $A^*(\omega)$  и  $S^*(\omega)$ , построим кривую вероятности выброса амплитуды реакции первого звена  $P_1(a)$  (рис. 1), по которой для заданной вероятности выброса находится значение максимума реакции.

В случае, когда система состоит из двух последовательно соединенных линейных звеньев, необходимо выявить такую комбинацию АЧХ  $A_k(\omega)$  и  $B_i(\omega)$ , при которой величина  $H$  достигает максимума:

$$H^* \{B^*(\omega), A^*(\omega)\} = \max_{\substack{1 \leq k \leq N_1 \\ 1 \leq i \leq N_2}} \left\{ \int_0^\infty A_k^2(\omega) B_i^2(\omega) S(\omega) d\omega \right\}. \quad (2)$$

Заметим, что в случае системы, состоящей из одного звена (1), в выражение для  $H$  (2) обяза-



**Рис. 1.** Определение максимальной реакции первого и второго звена на расчетный сейсмический сигнал:  $A(\omega)$ ,  $B(\omega)$  – АЧХ;  $S_1(\omega)$ ,  $S_2(\omega)$  – спектральные плотности;  $P_1(a)$ ,  $P_2(a)$  – вероятности выбросов амплитуды за границу;  $U_1^*$ ,  $U_2^*$  – максимальные выбросы;  $\ddot{a}_0^1$ ,  $\ddot{a}_0^2$  – реакция на расчетный сейсмосигнал

тельно должна входить именно та  $A^*(\omega)$ , при которой  $H$  достигает максимума. Величина максимального ускорения с заданной вероятностью превышения находится аналогично случаю системы с одним звеном.

Определение реакций электрооборудования на сейсмические нагрузки является необходимым условием для выработки мероприятий, повышающих его надежность.

#### Методика и результаты вероятностной оценки сейсмостойкости электрооборудования

Критерием сейсмоустойчивости электрооборудования является его надёжное функционирование при заданных сейсмических нагрузках, отсутствие ложных срабатываний коммутационных приборов, отсутствие механических повреждений конструкции в целом и комплектующих изделий, влекущих за собой изменение параметров и потерю работоспособности электрических цепей.

Динамические характеристики однотипных изделий не идентичны, а зависят от качества сборочных работ и закрепления на штатных местах, т. е. АЧХ изделий имеют определенный разброс.

Учитывая, что ускорения, воздействующие на комплектующие изделия при одном и том же сейсмическом сигнале, зависят от АЧХ электрооборудования, возникла необходимость определения вероятности появления максимальных ускорений на

комплектующих изделиях при найденных экспериментальным путем интервалах разброса АЧХ серийно выпускаемых однотипных изделий.

Одним из эффективных способов обеспечения сейсмостойкости электрооборудования является повышение жесткости несущих конструкций. Это достигается не только изменением самой конструкции, но введением дополнительных жестких связей между элементами электрооборудования и конструкциями здания. Для имитации разных условий закрепления электрооборудования на строительные конструкции при проведении стендовых испытаний, использовалось натяжное вантовое раскрепление.

Натяжением вант имитировались различные способы закрепления панелей управления щитов 2Р22 для станков с числовым программным управлением в натуральных условиях и возможный разброс их собственных динамических характеристик. При каждом изменении натяжения вант фиксировалось АЧХ.

Результаты разброса резонансных частот и добротностей по формам колебаний сведены в таблицу.

На рис. 2 показаны изменения АЧХ панели в зависимости от натяжения вант. В зависимости от динамических характеристик однотипных изделий реакция каждого из них, а значит и сейсмостойкость, на один и тот же сейсмический сигнал неоднозначна.

**Таблица.** Добротности панелей управления на резонансных частотах. Секция из двух панелей управления

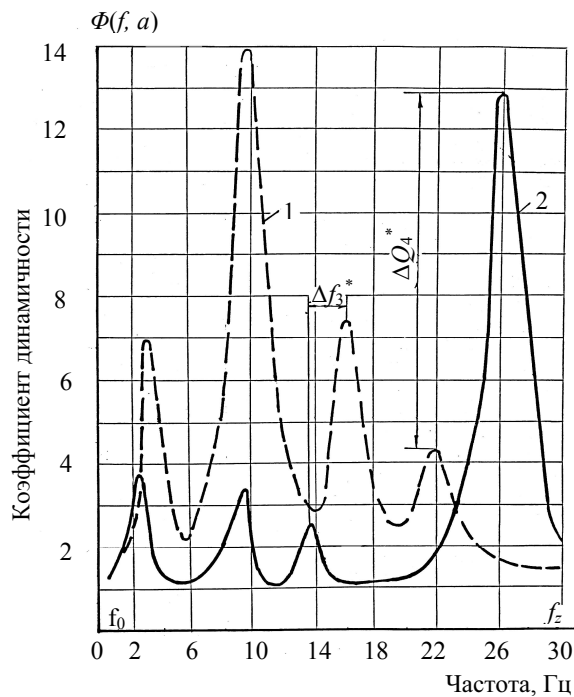
Величина натяжения вант, кН	Резонансные частоты, Гц				Добротности панелей управления на резонансных частотах			
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
0	3,2	9,5	16,5	21,7	7,8	14,0	8,3	4,3
2	3,8	10,0	15,2	22,0	7,0	9,5	8,3	10,0
4	6,3	12,8	18,0	24,3	5,0	4,2	8,0	12,4
5	4,8	11,5	16,0	28,2	3,7	3,3	2,6	14,8
Интервалы изменения резонансных частот и добротностей	3,2±4,8	9,5±12,8	15,2±18,0	21,7±28,2	3,7±7,8	3,3±14,0	2,6±8,3	4,3±14,8

Исследование сейсмостойкости однотипных изделий на заданный набор расчетных акселерограмм землетрясений проводилось с использованием математического моделирования АЧХ щитов управления 2Р22, что позволило получить вероятностную оценку возникновения максимальных ускорений на комплектующих изделиях с учетом разброса динамических характеристик серийно выпускаемого оборудования.

Известно [4], что АЧХ сложных колебательных систем моделируются набором линейных осцилляторов. Коэффициент динамичности линейного осциллятора определен выражением:

$$A^0(r, \varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2-r^2\varepsilon^2)}}, \quad \varepsilon = \frac{1}{Q} = \frac{\delta}{f},$$

где  $r = \Omega/f$ ,  $\Omega$  – частота внешней силы;  $f$  – собственная частота линейного осциллятора;  $\delta$  – логарифмический декремент затухания колебаний;  $Q$  – добротность линейного осциллятора.



**Рис. 2.** АЧХ секций панелей: 1) без вантового раскрепления; 2) с раскрепленными вантами

Если АЧХ (рис. 2) задана функцией  $\Phi(f, a)$ , то эту функцию можно аппроксимировать суммой

функций  $c_i A_i(r_i, \varepsilon_i)$ , где  $A_i$  – количество линейных осцилляторов (в рассматриваемой работе  $i=4$ ),  $c_i$  – коэффициент формы.

Для того чтобы АЧХ системы линейных осцилляторов соответствовала АЧХ исследуемого изделия, необходимо подобрать коэффициенты форм  $c_i$  каждого линейного осциллятора. Определим подбор коэффициентов  $c_i$  требованием, чтобы квадрат разности всех точек  $\Phi(f, a)$  от  $\sum_{i=1}^4 c_i A_i(r_i, \varepsilon_i)$  был минимальным. Воспользуемся необходимым условием минимума функции двух переменных, в данном случае:

$$\sum_{f_0=1}^{f_1=30} [\Phi(f, a) - \sum_{i=1}^4 c_i A_i(r_i, \varepsilon_i)]^2 = \mu,$$

где  $\mu$  – среднеквадратичное отклонение.

Приравняем нулю её частные производные по  $A_i$ , в итоге получим систему уравнений для определения параметров  $c_i$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mu}{\partial A_1} &= 0 \left\{ \sum_{f_0=1}^{f_1=30} 2A_1(r_1, \varepsilon_1)c_1^2 - 2\Phi(f, a)c_1 + \right. \\ &+ 2A_2(r_2, \varepsilon_2)c_1c_2 + 2A_3(r_3, \varepsilon_3)c_1c_3 + 2A_4(r_4, \varepsilon_4)c_1c_4 = 0 \\ \frac{\partial \mu}{\partial A_2} &= 0 \left\{ \sum_{f_0=1}^{f_1=30} 2A_2(r_2, \varepsilon_2)c_2^2 - \Phi(f, a)c_2 + \right. \\ &+ 2A_1(r_1, \varepsilon_1)c_1c_2 + 2A_3(r_3, \varepsilon_3)c_2c_3 + 2A_4(r_4, \varepsilon_4)c_2c_4 = 0 \\ \frac{\partial \mu}{\partial A_3} &= 0 \left\{ \sum_{f_0=1}^{f_1=30} 2A_3(r_3, \varepsilon_3)c_3^2 - \Phi(f, a)c_3 + \right. \\ &+ 2A_1(r_1, \varepsilon_1)c_1c_3 + 2A_2(r_2, \varepsilon_2)c_2c_3 + 2A_4(r_4, \varepsilon_4)c_3c_4 = 0 \\ \frac{\partial \mu}{\partial A_4} &= 0 \left\{ \sum_{f_0=1}^{f_1=30} 2A_4(r_4, \varepsilon_4)c_4^2 - \Phi(f, a)c_4 + \right. \\ &+ 2A_1(r_1, \varepsilon_1)c_1c_4 + 2A_2(r_2, \varepsilon_2)c_2c_4 + 2A_3(r_3, \varepsilon_3)c_3c_4 = 0 \end{aligned} \right\}.$$

На рис. 3 представлена блок-схема и алгоритм определения вероятностной оценки абсолютных максимумов ускорений, возникающих в исследуемом объекте, имеющем разброс динамических характеристик, который задаётся случайным образом в заданном интервале.

На основании проведенных расчетов при количестве численных экспериментов  $K=96$  максимальная величина ускорения оказалась равной  $36 \text{ м/с}^2$ , а с вероятностью  $P=0,3$  максимальные ускорения, возникающие в оборудовании находятся в интервале  $16...36 \text{ м/с}^2$ .

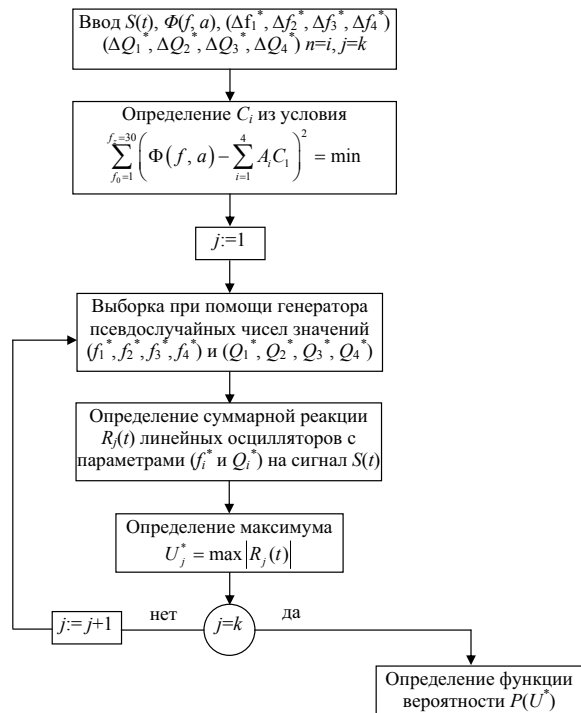


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения вероятностной оценки максимумов ускорений

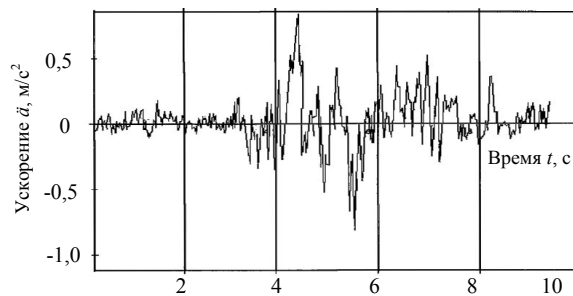


Рис. 4. Сейсмический сигнал

Для надежного функционирования панелей управления при заданном разбросе, обусловленном особенностями сборочных работ и закреплением на штатных местах, с вероятностью  $P=0,99$

ускорения в местах закрепления комплектующих изделий не превысят  $36 \text{ м/с}^2$ , следовательно, они должны быть вибростойкими в частотном диапазоне  $1...30 \text{ Гц}$  при ускорениях до  $36 \text{ м/с}^2$ .

Расчет функций вероятностей распределения максимумов ускорения проводился для панелей щитов управления, имеющих АЧХ (рис. 2), входное воздействие задавалось сейсмическим сигналом (рис. 4).

На рис. 5 приведена функция вероятности распределения максимумов ускорений.

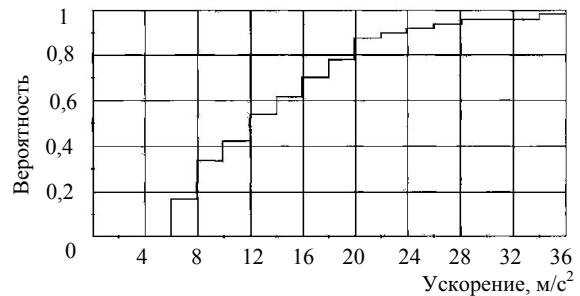


Рис. 5. Функция вероятности распределения максимумов ускорения

### Заключение

Разработаны методика и алгоритм вероятностной оценки абсолютных максимумов ускорений в объекте с разбросом динамических характеристик в заданном интервале частот. Получена функция вероятности распределения ускорений, возникающих в контрольных точках с учетом возможного разброса динамических характеристик оборудования на случайные стационарные воздействия, заданной продолжительности. Предварительная вероятностная оценка сейсмостойкости опытных образцов оборудования, систем управления позволяет уже на стадии проектирования сделать некоторые общие выводы о специфике поведения оборудования при сейсмических воздействиях, дать рекомендации и определить мероприятия, повышающие их сейсмостойкость.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. — М.: Стройиздат, 1982. — 206 с.
- Айзенберг Я.М. Статистическая расчетная модель сейсмического воздействия на сооружения // В кн.: Сейсмические воздействия на гидротехнические и энергетические сооружения. — М.: Наука, 1980. — С. 5–11.
- Иорши Ю.К. Виброметрия. — М.: Машгиз, 1963. — 771 с.
- Керопян К.К., Чеголин П.М. Электрическое моделирование в строительной механике. — М.: Госстройиздат, 1963. — 391 с.
- Амбриашвили Ю.К., Пискарев В.В. Методы выбора и построения синтезированных акселерограмм для расчета энергетических объектов на сейсмические воздействия // Труды ЦКТИ. Вып. 212. — Л.: 1984. — С. 114–122.
- Кириллов А.П., Лукин В.В., Пискарев В.В. О необходимости проведения испытаний электротехнического оборудования на сейсмостойкость в условиях АЭС // Электрические станции. — 1984. — № 1. — С. 2–4.
- Хахо И.Х. К вопросу анализа устойчивости и надежности работы электротехнического оборудования, систем управления и технологической защиты // Надежность. — 2004. — № 3. — С. 28–34.
- Хахо И.Х. Вероятностный подход к оценке устойчивости электротехнического оборудования // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН РФ. — 2005. — № 2. — С. 29–37.
- Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов. — М.: Наука, 1970. — 392 с.

Поступила 28.03.2008 г.